

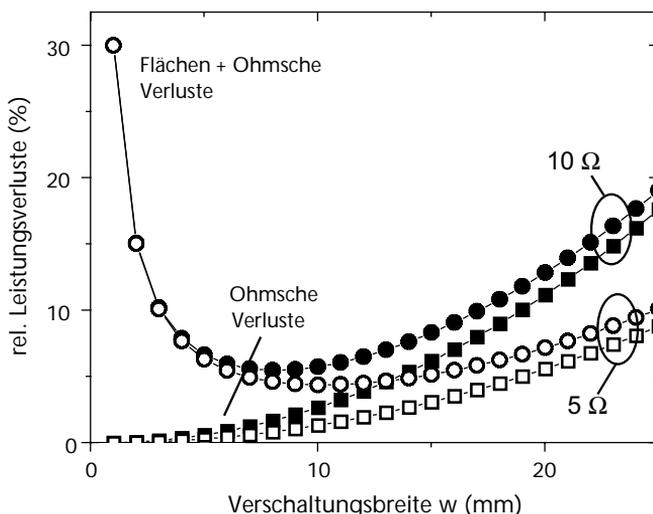
TCO für Silizium-Dünnschichtsolarmodule: Status und Perspektiven

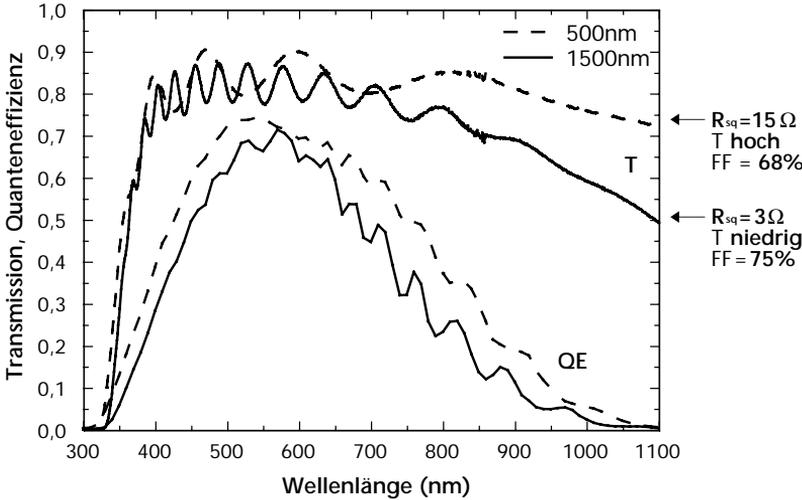
Joachim Müller,
 Bernd Rech
 Forschungszentrum Jülich
 Institut für Photovoltaik (IPV)
 Joa.Mueller@fz-juelich.de
 b.rech@fz-juelich.de
 Peter Lechner,
 Horst Schade
 RWE Solar GmbH,
 Geschäftsbereich
 Photronics,
 Hermann-Oberth-Straße 11,
 85640 Putzbrunn

Transparente und leitfähige Oxide (TCOs) bilden als Frontkontakte einen integralen Bestandteil von Silizium-Dünnschichtsolarmodulen auf der Basis von amorphem (a-Si) oder mikrokristallinem ($\mu\text{-Si}$) Silizium. In der sogenannten „Superstrate“-Technologie werden TCO-beschichtete Glassubstrate verwendet. Die Kombination der elektrischen und optischen Eigenschaften der TCO-Schicht ist entscheidend für den Wirkungsgrad der Dünnschichtmodule.

Elektrisch gesehen verursacht der TCO-Schichtwiderstand Ohmsche Verluste bei der integrierten Serienschaltung der Zellen zu Modulen. Exemplarisch sind in *Abb. 1* die relativen Leistungsverluste für ein a-Si/ $\mu\text{-Si}$ -Solarmodul in

Abbildung 1
 Relative Leistungsverluste für ein a-Si/ $\mu\text{-Si}$ -Solarmodul in Abhängigkeit von der Verschaltungsbreite w für TCO-Flächenwiderstände R_{sq} von 5 bzw. 10 Ohm.





Abhängigkeit von der Verschaltungsweite für TCO-Flächenwiderstände von 5 bzw. 10 Ohm dargestellt. Die zunehmenden Ohmschen Verluste und die abnehmenden Flächenverluste bei größer werdender Verschaltungsweite w (Breite der Zellstreifen) führen in der Summe zu einem Minimum der Gesamtverlustkurve bei einer bestimmten Verschaltungsweite. Je geringer der TCO-Schichtwiderstand desto niedriger liegt dieses Verlustminimum.

Ein geringer Schichtwiderstand und damit geringe elektrische Verluste ließen sich beispielsweise durch eine große TCO-Schichtdicke erreichen. Allerdings erhöht sich damit die Absorbanz der Schicht, wodurch die optischen Verluste anwachsen. Das in *Abb. 2* dargestellte Experiment demonstriert das Optimierungsproblem zwischen diesen gegenläufigen Anforderungen von möglichst hoher elektrischer Leitfähigkeit und möglichst geringer Absorbanz.

Abbildung 2

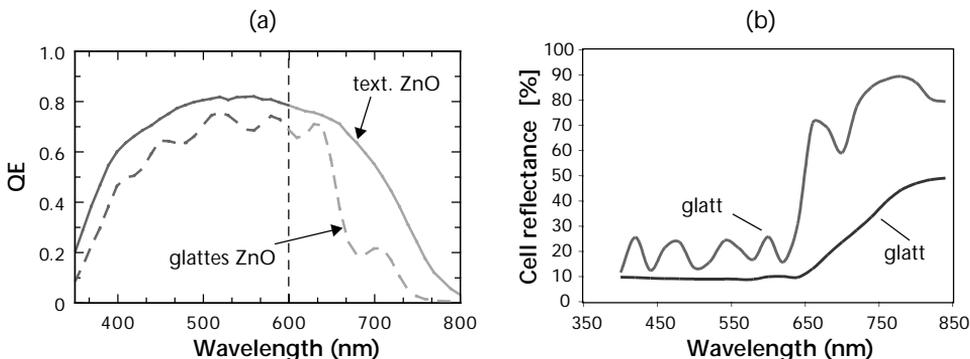
Transmission T , Quanteneffizienz QE und Füllfaktor FF zweier identischer $\mu\text{-Si:H}$ Solarzellen auf dickem (1500 nm, $R_{sq} = 3 \text{ Ohm}$) und dünnem (500 nm; $R_{sq} = 15 \text{ Ohm}$) TCO.

Gezeigt sind die Transmissions(T)- und die Quanteneffizienz(QE)-Kurven zweier identischer mikrokristalliner Solarzellen auf dickem (1500 nm, $R_{sq} = 3 \text{ Ohm}$) und dünnem (500 nm, $R_{sq} = 15 \text{ Ohm}$) TCO. Die dünnere TCO-Schicht zeigt im gesamten relevanten Spektralbereich eine höhere Transmission und Quanteneffizienz. Allerdings erreicht die Solarzelle hier lediglich einen Füllfaktor von 68 %, während für die Vergleichszelle auf dem dicken (und damit stärker absorbierenden) TCO ein Füllfaktor von 75 % erreicht wird.

Abbildung 3

Quanteneffizienz und Reflexion zweier identischer a-Si:H-Solarzellen auf glattem und rauem TCO. Im kurzwelligen Spektralbereich verbessert die Rauigkeit die Lichteinkopplung in die Zelle, für langwelliges Licht kommt der "Light Trapping"-Effekt zum Tragen.

Als letzte wesentliche Anforderung für den Einsatz in Si-Dünnschichtsolarmodulen müssen TCO-Schichten eine raue Oberflächenmorphologie besitzen, welche zu einer verbesserten Lichteinkopplung und überdies durch Streuung zur Lichtwegverlängerung in der photoaktiven Schicht führt ("light trapping"). Abb. 3 zeigt Quanteneffizienz und Reflexion zweier identischer a-Si:H Solarzellen, die auf glattem bzw. rauem TCO abgeschieden wurden. Im kurzwelligen Spektralbereich verbessert die Rauigkeit aufgrund eines "Index Grading"-Effekts die Lichteinkopplung in die Zelle. Für das schwächer absorbierte langwellige Licht sorgt die raue TCO/Si-Grenzfläche für Lichtstreuung und, in



| Verfahren | Hersteller | Vor- und Nachteile |
|---|---|---|
| APCVD (atmospheric pressure chemical vapor deposition) on-line | Pilkington North America AFG Industries (USA) | + gute Transparenz/Leitfähigkeit + relativ kostengünstig - Grünglas (Abs. im NIR, $\mu\text{-Si}$) - nicht angepasstes Lichtstreuvermögen - Qualitätsschwankungen |
| | Nippon Sheet Glass (Japan) | + gute Transparenz/Leitfähigkeit + sehr gutes Lichtstreuvermögen + Weißglas ($\mu\text{-Si}$) - (wahrscheinlich) teuer - bislang nur japanischer Markt (v.a. Kaneka) |
| APCVD off-line | Asahi Glass (Japan) | + gute Transparenz + sehr gutes Lichtstreuvermögen - mäßig gute Leitfähigkeit - (wahrscheinlich) teuer - nur japanischer Markt (v.a. Kaneka) |

Verbindung mit dem Rückreflektor, für ein effektives "Light Trapping". Beide Mechanismen erhöhen die Quantenausbeute deutlich; die gemessene Reflexion der Zelle auf dem rauen Substrat verringert sich.

Fluor-dotierte Zinnoxidfilme ($\text{SnO}_2\text{:F}$) erfüllen diese Kriterien bereits recht gut und werden von einigen Firmen in den USA (Pilkington North America und AFG Industries) sowie Japan (Asahi Glass und Nippon Sheet Glass) hergestellt. TCO-beschichtete Glassubstrate sind ein entscheidender Kostenfaktor in der Modulproduktion.

An Floatglaslinien on-line hergestelltes TCO ist im allgemeinen kostengünstig erhältlich, aber häufig nicht optimal angepasst an die Anforderungen in Solarmodulen. Die Frage stellt sich jeweils, ob höhere Kosten anderer Herstellverfahren mit besserer Anpassung durch die damit erzielte

*Tabelle 1
Überblick über Herstellung, Eigenschaften und Verfügbare von $\text{SnO}_2\text{:F}$ -beschichteten Glassubstraten für den Einsatz in Si-Dünnschichtsolarmodulen (Stand Mitte 2002).*

| Material | Herstellungsverfahren | Firma / Institut |
|----------|-----------------------------------|---|
| ZnO:B | LPCVD | IMT (Neuchâtel, CH) |
| ZnO(:Al) | Expanding Thermal Plasma | TU Eindhoven/ECN/ Uni Utrecht/ TNO-TPD (NL) |
| ZnO:Ga | Magnetronspütern | Asahi Glass (Japan) |
| ZnO:Al | Magnetronspütern & Texturätzen | FZJ – IPV (Jülich) (Sharp, AIST; Japan) |

*Tabelle 2
Überblick über Entwicklung
von ZnO-Schichten für den
Einsatz in Si-Dünnschicht-
solarzellen.*

Leistungserhöhung kompensiert werden können. *Tab. 1* gibt einen Überblick über die wichtigsten Eigenschaften und Hersteller von SnO₂-beschichteten Glassubstraten sowie deren Verfügbarkeit.

Eine vielversprechende Alternative zu den oben beschriebenen Zinnoxidfilmen bieten texturierte Zinkoxidfilme (ZnO) unterschiedlicher Dotierung. Solche Filme können durch mehrere Verfahren mit äußerst geringer Absorbanz und hinreichend kleinem Schichtwiderstand hergestellt werden. Verfahren zur ZnO-Abscheidung für Solarzellenanwendungen sind beispielsweise LPCVD (low pressure chemical vapor deposition), was auf mittlerer bis großer Fläche intensiv am Institut de Microtechnique (IMT) der Universität Neuchâtel untersucht wird, oder Expanding Thermal Plasma CVD (TU Eindhoven/ECN/Uni Utrecht/TNO-TPD). *Tab. 2* gibt einen Überblick über eingesetzte Dotierstoffe und Herstellungsverfahren.

Am IPV wird die Sputtertechnologie zur ZnO-Abscheidung verwendet, bei der durch anschließende nasschemische Ätzung die Oberflächenmorphologie der Schichten variiert werden kann. Bei entsprechender Wahl der Sputterbedingungen bildet sich nach dem Ätzschritt eine kraterartige Struktur aus wie sie in *Abb. 4* in einer SEM-Aufnahme gezeigt ist.

Texturiertes ZnO erweist sich durch seine exzellenten Lichtstreuungseigenschaften gerade im langwelligen Spektralbereich als besonders geeignet für den Einsatz in Solarzellen mit Absorberschichten aus mikrokristallinem Silizium. So wurde im Labormaßstab für a-Si/a-Si-Tandemzellen ein hoher stabiler Wirkungsgrad von 9.2 % ($FF = 66\%$, $V_{oc} = 1.7\text{ mV}$, $J_{sc} = 8.2\text{ mA/cm}^2$), für a-Si/ $\mu\text{c-Si}$ -Tandemzellen von 11.3 % ($FF = 70.0\%$, $V_{oc} = 1.42\text{ V}$, $J_{sc} = 11.4\text{ mA/cm}^2$) erreicht. Der beste Wirkungsgrad für eine $\mu\text{c-Si}$ Einzelzelle betrug 9.0 % ($FF = 71.6\%$, $V_{oc} = 530\text{ mV}$, $J_{sc} = 23.7\text{ mA/cm}^2$).

Text. ZnO
Vergr. 100.000-fach

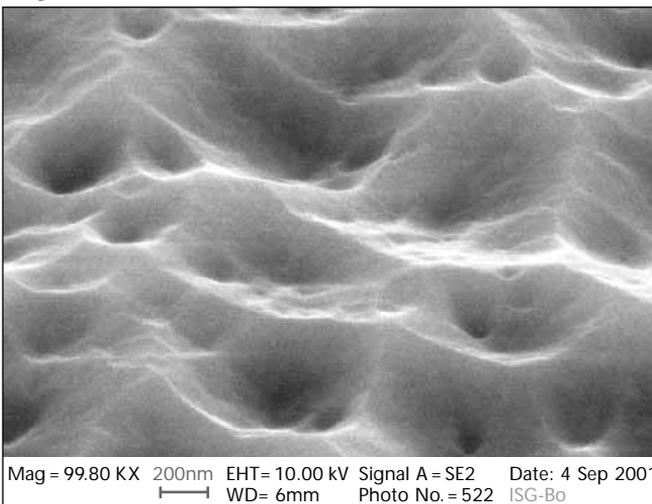


Abbildung 4
SEM-Aufnahme einer durch Magnetronputtern hergestellten und anschließend nasschemisch in 0.5 % Salzsäure texturierten ZnO-Schicht (Vergrößerung 100.000-fach).

Die Herausforderung besteht in der Aufskalierung und Entwicklung von kostengünstigen ZnO-Filmen für Solarmodule. Diese Aufskalierung findet derzeit für eine Substratgröße von $30 \times 30 \text{ cm}^2$ im Rahmen des Prozesstechnologieprojekts am IPV, für eine Substratgröße bis 0.6 m^2 im Rahmen eines BMWi-Verbundprojekts in einem Konsortium aus Wissenschaft und Industrie statt. Partner in diesem Projekt sind das Fraunhofer Institut für Schicht- und Oberflächentechnik (FhG-IST, Braunschweig), Applied Films GmbH&Co.KG (Alzenau), Sentech Instruments GmbH (Berlin), RWE Solar GmbH (Putzbrunn) und das Institut für Photovoltaik (FZ-IPV, Jülich). In diesem Konsortium ist bereits die Herstellung großflächig homogener sowie hochtransparenter, hochleitfähiger und texturierbarer ZnO-Schichten mittels Hochraten-Mittelfrequenzsputtern von metallischen Zn:Al-Targets gelungen.

Übergeordnetes Ziel all dieser Anstrengungen ist die Entwicklung von kostengünstig und großflächig hergestellten TCO-Materialien für die nächste Generation von Silizium-Dünnschichtsolarmodulen. Dies ist möglicherweise die sehr vielversprechende amorph-mikrokristalline Tandemzelltechnologie. Notwendig zur Erreichung dieses Ziels ist neben einer Kooperation der Forschungseinrichtungen und Universitäten vor allen Dingen auch eine intensive Beteiligung von Glasindustrie und Anlagenbauern, um das dort vorhandene Know-How zur Glasherstellung und Beschichtungstechnik in den Entwicklungsprozess einzubringen.